

基于 GC – TOPSIS 模型的水资源管理绩效评价及障碍度分析

罗浩^{1,2}, 周维博^{1,2}, 白洁芳³, 唐继张^{1,2}, 杨阿敏^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 黄河水土保持天水治理监督局, 甘肃 天水 741000)

摘要: 建立基于开发利用、用水效率和限制纳污的水资源管理绩效评价体系, 采用博弈论确定的组合系数构建 GC – TOPSIS 模型, 对 2005 – 2016 年西安市的水资源管理绩效评价。同时, 采用障碍度模型对影响管理绩效的关键因素进行分析研究。研究结果表明: 2005 – 2016 年西安市水资源管理综合绩效整体呈上升趋势, 绩效水平由中级转为良好, 单准则层绩效与综合绩效的变化趋势基本一致, 均具有良好的发展态势; 开发利用准则层障碍度持续增高, 是水资源管理绩效的最大障碍因素, 而用水效率和限制纳污两个准则层障碍度则不断下降; 指标用水量变化率和人均日生活用水量将是今后一段时期的主要障碍因子。开源节流、培养居民自主节水意识是提高西安市水资源管理绩效的关键。

关键词: 水资源管理绩效; 障碍度; 三条红线; GC – TOPSIS 模型; 西安市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0026-06

Performance evaluation and obstacle degree analysis of water resources management based on GC – TOPSIS Model

LUO Hao^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}, BAI Jiefang³, TANG Jizhang^{1,2}, YANG Amin^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Tianshui Governance and Supervision Bureau of Yellow River Soil and Water Conservation, Tianshui 741000, China)

Abstract: The evaluation index system of water resources management performance was established based on development and utilization, water use efficiency and restriction of pollution. The GC – TOPSIS model was constructed using the combination coefficients determined by game theory, and the water resources management performance of Xi'an City from 2005 to 2016 was evaluated. In addition, the key obstacle indicators were analyzed by an obstacle degree model. The results showed that the overall performance of water resources gradually increased during the 12 years. The performance degree changed from middle level to good, and the trend of single – strategy layer performance and comprehensive performance were basically the same, and both had a good development trend. In terms of obstacle degree, the criterion layer obstacle degree of development and utilization was increasing continuously, which is the main obstacle to the water resource management performance. The criterion layer obstacle degree of water use efficiency and restriction of pollution showed a decreasing trend. In the future, the main obstacle indicators are the rate of change in total water use and per capita daily living water. Cultivating residents' awareness of water saving and open source and expenditure reduction was crucial to the urban water resources management performance improvement.

Key words: water resources management performance; obstacle degree; Three Red Lines; GC – TOPSIS

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-04-08

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120113004800)

作者简介: 罗浩 (1996-), 男, 四川巴中人, 硕士研究生, 研究方向为水资源、水生态及水环境。

通讯作者: 周维博 (1956-), 男, 陕西乾县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源、水环境及节水灌溉。

model(Gray Correlation - TOPSIS Model); Xi'an City

1 研究背景

水资源管理绩效评价是监控水资源管理水平的一种重要手段,能从多个方面审视水资源管理成效,对于水资源管理工作的开展和落实具有重要意义^[1-4]。近几年,许多学者对水资源管理绩效评价进行了分析研究。任珩等^[5]着眼于干旱区水资源管理政策的制定和实施,建立了“政策认知+效率+社会环境效益”的绩效评价体系,分析评价了甘肃省民勤绿洲1963-2008年的水资源管理政策绩效。吴丹等^[6]针对我国七大流域,以经济、社会和环境3个方面的绩效为核心,详细分析了其12 a水资源综合管理绩效指数变化态势及影响因素。杨丹^[7]构建了水资源“三条红线”管理绩效评价体系,实证分析了济南市2006-2011年的水资源管理能力。凌佳楠等^[8]对宝应县2015年的水资源管理效果进行了分级评价。使用的研究方法主要有突变级数法^[5]、主成分分析^[9]、AHP法^[10]、灰色关联法(Gray Correlation, GC)^[11]、物元可拓模型^[12]、逼近理想解排序(TOPSIS)^[13]。

上述研究成果为水资源绩效评价的进一步研究奠定了较好的基础,但也存在着一些不足,如缺乏普适易用的研究方法、未具体分析关键影响因子。灰色关联理想解法(GC-TOPSIS)是由GC与TOPSIS法耦合而成,其结合了两评价方法各自的优点,克服了单一评价的不足^[14]。目前,该法已被成功应用

于秸秆综合利用方案优选^[15]、灌溉用水效率评价^[16]等多个领域。鉴于此,为了更加全面客观地进行水资源管理绩效评价,本文使用GC-TOPSIS评价模型和障碍度模型^[17],对西安市近12年(2005-2016年)的水资源管理绩效进行评价和障碍因素识别,以期为提高城市水资源管理绩效和建立完善长效的水资源管理机制提供参考。

2 评价指标体系

现阶段我国实行最严格水资源管理制度,而“三条红线”正是该制度的核心内容。因此本文立足于已有文献中有关建立水资源管理评价体系和思路,以“三条红线”为基础,从开发利用,用水效率和限制纳污3个角度构建水资源管理绩效评价体系(图1)。在评价指标的筛选上,遵循科学性、目的性、可对比性和易操作性原则。具体为:(1)开发利用准则层上,主要考虑了区域的用水总量变化和生、产、生活、生态等单方面用水的情况,同时为反映对地下水超采问题的管理,增加了地下水供水比例指标;(2)用水效率准则层上,主要考虑了工农业及生活方面的用水和供水效率;(3)限制纳污准则层上,主要考虑了COD、氨氮和废污水的排放以及污水处理情况。本文采用博弈组合权重法来确定评价指标的权重,其中主观权重使用AHP法确定,客观权重来自改进熵权法。方法原理及基本步骤见文献^[16],此不赘述。

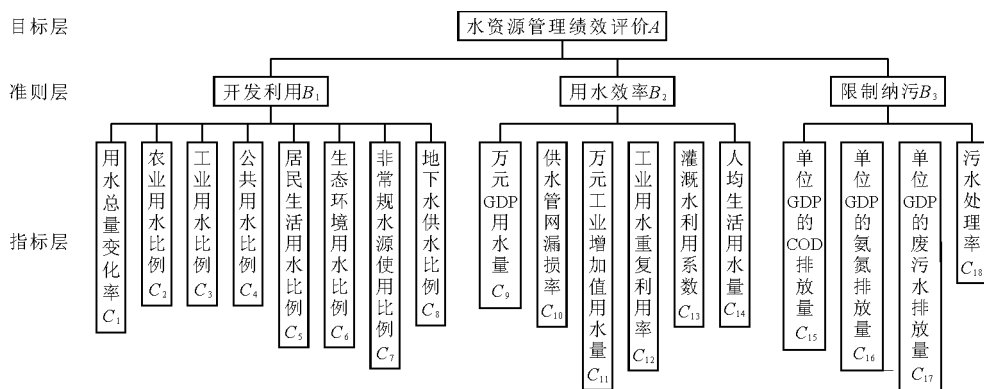


图1 水资源管理绩效评价体系

3 评价方法和模型

3.1 GC-TOPSIS 模型

GC-TOPSIS法本质是以组合系数来调解TOPSIS与GC法评价结果的不一致,从而实现两种方法

的集化或融合。组合系数通常由决策者对位置与形态的偏好程度确定,带有主观性。博弈论是研究含竞争性现象的方法,陈加良^[18]用Nash均衡为协调目标,将博弈论引入到不同赋权方法的集结问题中,并取得很好的效果。基于上述原理,本文采用博

博弈方法确定组合系数,以寻求位置与形状态势之间的均衡,消除人为确定系数带来的主观性。计算步骤如下:

设原始数据构成的评价矩阵为 $X = [x_{ij}]_{n \times m}$, x_{ij} 为水管理绩效评价中第 i 个样本第 j 个评价指标的原始属性值;指标组合权重为 $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$ 。

(1) 标准化处理,采用极值处理法获得规范化评价矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$ 。

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}}, & j \text{ 为越大越优 (正向) 型指标} \\ \frac{\max_i \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}}, & j \text{ 为越小越优 (逆向) 型指标} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 权重乘以规范化评价矩阵得到加权决策矩阵 $T = (t_{ij})_{n \times m} = \mu^T Y$ 。

(3) 获取正理想解 T_0^+ 与负理想解 T_0^- 。

$$T_0^+ = [\max_{1 \leq i \leq n} (\{t_{ij}\}_{i=1}^n)] = \{T_1^+, T_2^+, \dots, T_m^+\} \quad (2)$$

$(j = 1, 2, \dots, m)$

$$T_0^- = [\min_{1 \leq i \leq n} (\{t_{ij}\}_{i=1}^n)] = \{T_1^-, T_2^-, \dots, T_m^-\} \quad (3)$$

$(j = 1, 2, \dots, m)$

(4) 计算样本到正、负理想解的欧氏距离 D_i^+ 和 D_i^- 。

$$D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (T_{ij} - T_j^*)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: * 代表“+”或者“-”,下同。

(5) 求样本与正、负理想解的灰色关联度 R_i^+ 和 R_i^- 。

$$r_{ij}^* = \frac{\min_i \min_j |T_{ij} - T_j^*| + \rho^* \max_i \max_j |T_{ij} - T_j^*|}{|T_{ij} - T_j^*| + \rho^* \max_i \max_j |T_{ij} - T_j^*|} \quad (5)$$

$$R_i^* = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_{ij}^* \quad (6)$$

式中: ρ^* 为分辨系数,本文取 0.5。

(6) 无量纲化处理。

$$b_i^* = \frac{B_i^*}{\max_{1 \leq i \leq n} B_i^*} \quad (7)$$

式中: B_i^* 分别代表 D_i^+ 、 D_i^- 、 R_i^+ 和 R_i^- ; b_i^* 则分别对应 d_i^+ 、 d_i^- 、 r_i^+ 和 r_i^- 。

(7) 确定各样本的距离贴近度 E_i 和灰色关联贴近度 F_i ,取值范围均为 $[0, 1]$ 。

$$e_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$f_i = \frac{r_i^-}{r_i^+ + r_i^-} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

(8) 设由距离贴近度集矩阵 $W_1: W_1 = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}^T$ 和灰色关联贴近度集矩阵 $W_2: W_2 = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}^T$ 建立的两种评价方法的耦合为:

$$CS = \sum_{j=1}^2 \beta_j W_j = \beta_1 W_1 + \beta_2 W_2 \quad (10)$$

其中: $\beta_1, \beta_2 > 0$; $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。

(9) 基于博弈论思想,建立数学优化模型,优化组合系数 β_1 和 β_2 。

$$\min Q_k = \left\| \sum_{j=1}^2 \beta_j W_j - W_k^T \right\|_2, k = 1, 2 \quad (11)$$

(10) 可由矩阵微分性质求解出上式,得到 (β_1, β_2) ,归一化处理。

$$\beta_1^* = \frac{|\beta_1|}{|\beta_1| + |\beta_2|}, \beta_2^* = \frac{|\beta_2|}{|\beta_1| + |\beta_2|} \quad (12)$$

(11) 计算综合贴近度集 CS^* 。

$$CS^* = \beta_1^* W_1 + \beta_2^* W_2 \quad (13)$$

综合贴近度值越大,表明水资源管理绩效越优,越小则越差。根据参考文献[19],将水资源管理绩效综合贴近度分为 4 个等级,分别代表不同程度下的水资源管理绩效(表 1)。

表 1 水资源管理绩效评判标准

综合贴近度	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.3 ~ 0.6	0 ~ 0.3
绩效水平	优	良	中	低

3.2 障碍度模型

在评价水资源管理绩效的同时分析影响管理绩效的关键因子,有利于针对性地调整水资源管理思路和规划未来水资源管理的方向。

障碍度模型涉及到 3 个概念:障碍度 O_j (指标对水资源管理绩效的影响程度)、因子贡献度 (指标对水资源管理绩效评价的贡献,通常用指标权重 μ_j 表示)、指标偏离度 I_j (指标与水资源管理绩效目标的差值,一般表示为 $I_j = 1 - y_{ij}$)。第 j 个评价指标障碍度为:

$$O_j = \frac{I_j \cdot u_j}{\sum_{j=1}^m (I_j \cdot u_j)} \times 100\% \quad (14)$$

4 实证研究

4.1 研究区概况及数据来源

西安市是我国西北地区最大的城市,地处陕西

关中平原、黄河流域中部,下辖 13 个行政区县,总面积 10 180 km²。年均气温 13.3℃。年均蒸发量 852.7 mm,年均降水量 577 mm,降水呈南多北少的趋势,且年际、年内降水量分配极不均匀,因而造成地表径流变化速率大、水资源实际可控量少。本文所用数据主要来源于 2005 - 2016 年的《西安统计年鉴》和《西安市水资源公报》,并且以西安市供用水年报中的相关数据作为补充。

4.2 结果分析

4.2.1 权重及正、负理想解 根据前文所述方法,确定权重,获取正负理想解,见表 2。

表 2 权重及正、负理想解			
指标	权重	正理想解	负理想解
C_1	0.0825	0.0825	0
C_2	0.0786	0.0786	0
C_3	0.0591	0.0591	0
C_4	0.0268	0.0268	0
C_5	0.0403	0.0403	0
C_6	0.0426	0.0426	0
C_7	0.0219	0.0219	0
C_8	0.0475	0.0475	0
C_9	0.1017	0.1017	0
C_{10}	0.0341	0.0341	0
C_{11}	0.0549	0.0549	0
C_{12}	0.0520	0.0520	0
C_{13}	0.0747	0.0747	0
C_{14}	0.0394	0.0394	0
C_{15}	0.0586	0.0586	0
C_{16}	0.0558	0.0558	0
C_{17}	0.0455	0.0455	0
C_{18}	0.0840	0.0840	0

4.2.2 绩效评价 西安市 2005 - 2016 年水资源管理综合绩效评价结果如图 2。

由图 2 可知,2005 - 2016 年西安市水资源管理绩效逐渐上升,2016 年绩效值为 0.6944,是 2005 年的 2.13 倍,年均增长速率 7.10%。绩效水平经历了中级 - 良好的演变,研究初期大部分年份均处于中级绩效水平,末期发展为良好水平,未来还有很大的提升空间。根据 12 a 西安市水资源管理绩效特点,可分为 3 个阶段。

第 1 阶段(2005 - 2007 年),西安市水资源管理绩效整体处于中下水平,呈快速增长,2007 年达到

期间绩效最大值 0.4162,较 2005 年增长 27.52%,年均增速高达 12.92%。该时期西安市积极探索传统水利向现代水利的模式转变,努力建设节水型社会,颁布了《西安市黑河引水系统保护条例》、《西安市水利工程管理体制改革实施意见》等多部管理条例,制定了水资源论证、取水许可、计划用水等多项制度,加强了对水环境的综合治理,这些举措促进了绩效水平的高速提升。然而,由于研究初期绩效水平差,一系列管理制度措施尚在不断完善之中,其成效是持续性的,在短时间内无法完全呈现,故该研究期绩效整体水平仍然相对较低。

第 2 阶段(2008 - 2012 年),5 年间西安市水资源管理绩效逐年提高,较上一时段有了明显提升。绩效数值由 2008 年的 0.3822 上升至 2012 年的 0.5912,涨幅达 54.67%,年均增速为 11.52%,继续保持着高速增长。究其原因在于西安市大力推进水利管理机构改革,由市水务局统一行使城市供排水、水源保护以及再生水利用等管理职能,建立了统一指挥、权责明确的管理体制,一体化管理模式基本形成^[20]。

第 3 阶段(2013 - 2016 年),西安市水资源管理绩效处于良好水平,实现了质的飞跃。绩效由 0.6264 提高至 0.6944,涨幅 10.84%,年均增速 3.49%,呈稳步增长。其原因是国家越来越重视水资源管理,出台了《实行最严格水资源管理制度考核办法》等相关文件,自 2013 年起,将开始考核各省实施最严格水资源管理目标的完成情况,随后陕西省也制定了相关政策,如《陕西省人民政府关于实行最严格水资源管理制度的实施意见》。这一系列政策和措施的出台实施,使绩效得以持续提高。但是,由于基期水平高,绩效的提升难度相对较大,故增长速度放缓。

从水资源管理准则层绩效评价结果(图 3)来看,2005 - 2016 年 3 个准则层绩效评价值总体上均呈上升态势,与综合绩效变化趋势有很大的相关性。不同准则层间绩效变化也略有差异:开发利用绩效在 2012 年步入良好水平之前表现为振幅越来越小的波动增长,之后缓慢上升,年均增速 6.05%。用水效率绩效以年均 7.05% 的速度呈小幅度波动上升。限制纳污绩效从 2005 年的 0.1371 上升至 2016 年的 0.8551,涨幅最大,呈线性增长,年均增速高达 8.68%,绩效水平历经了由差到优的转变。

4.2.3 障碍因子分析 根据障碍度模型,分别计算出准则层障碍度(表 3)和指标层障碍度(表 4),用以诊断影响西安市水资源管理绩效的障碍因子。

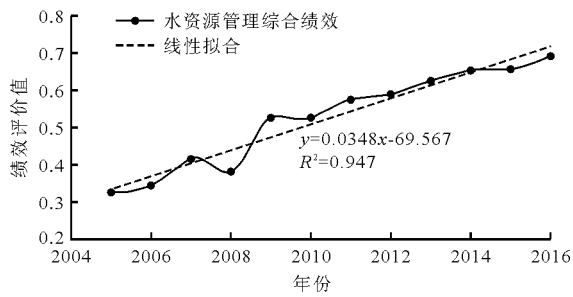


图2 2005-2016年西安市水资源管理综合绩效

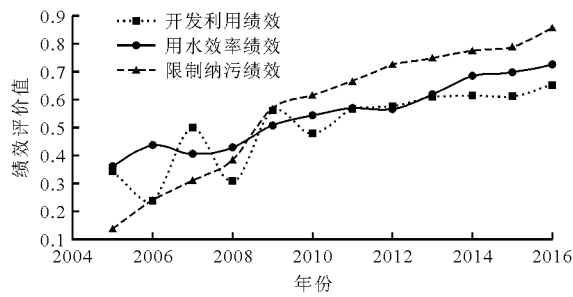


图3 2005-2016年西安市水资源管理单准则层绩效

表3 2005-2016年西安市水资源管理准则层障碍度 %

年份	开发利用	用水效率	限制纳污
2005	39.50	31.69	29.81
2006	45.35	26.16	28.49
2007	37.47	34.65	29.88
2008	44.88	31.14	23.98
2009	40.80	36.30	22.90
2010	49.22	31.17	19.61
2011	44.51	36.29	19.20
2012	46.31	39.32	14.37
2013	49.14	36.42	14.45
2014	57.16	30.29	12.54
2015	59.96	27.64	12.40
2016	73.50	24.97	1.53

由表3可知,3个准则层障碍度在2005-2007年相差不大,但变化趋势具有一定差异。在整个研究期间,开发利用障碍度呈指数上涨,年均增速高达

6.05%,数值始终最大,是阻碍西安市水资源管理绩效提升的最大因素;用水效率障碍度整体基本稳定于30%附近,于2012年后有缓慢下降趋势,除2006年值最小之外,其他年份值均位于第二位,是影响西安市水资源管理绩效水平的第二大因素;限制纳污障碍度则与用水总量障碍度变化趋势相反,呈线性递减。以上表明西安市在限制纳污的管理方面具有很大进步,若要提高西安市水资源管理绩效,需更加重视开发利用和用水效率绩效的提升。

表4中仅列出了排序前5位的指标障碍因子。结果显示:第1阶段(2005-2007年),城市污水处理率、万元GDP用水量、农业用水比例和工业用水比例这4项指标对西安市水资源管理绩效的影响最大且较为持续,4项指标涉及到所有准则层。主要原因在于,该时期西安市用水以工业和农业为主,两者占总用水量的70%以上,用水量高但经济收益低,同时基础设施不够完善,污水处理配置较为缺乏

表4 2005-2016年西安市水资源管理绩效指标层主要障碍因子障碍度 %

指标 排序	2005年		2006年		2007年		2008年		2009年		2010年	
	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%
1	C_9	12.43	C_8	11.84	C_2	12.30	C_1	12.26	C_{13}	14.20	C_{13}	14.54
2	C_{18}	10.27	C_{18}	10.89	C_{18}	12.10	C_{13}	10.25	C_2	13.08	C_1	13.02
3	C_3	7.22	C_1	10.38	C_{13}	11.70	C_{18}	10.19	C_6	8.88	C_2	11.00
4	C_{15}	7.16	C_2	8.25	C_9	8.72	C_2	7.56	C_8	7.73	C_6	8.93
5	C_2	6.91	C_3	7.47	C_{15}	8.52	C_3	7.05	C_{15}	7.50	C_8	7.55

指标 排序	2011年		2012年		2013年		2014年		2015年		2016年	
	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%	障碍 因子	障碍 度/%
1	C_1	19.68	C_1	19.17	C_1	25.87	C_1	31.66	C_1	38.25	C_1	49.21
2	C_{13}	12.11	C_{13}	11.21	C_{14}	14.72	C_{14}	9.45	C_{14}	12.47	C_{14}	20.32
3	C_{16}	7.22	C_{14}	11.06	C_{10}	9.54	C_{12}	8.93	C_{10}	8.30	C_5	13.49
4	C_{10}	7.07	C_{10}	7.50	C_{12}	7.67	C_{16}	7.44	C_3	7.45	C_3	10.79
5	C_{14}	6.48	C_6	6.50	C_{16}	7.20	C_3	7.24	C_5	6.90	C_{12}	4.65

第2阶段(2008-2012年),随着前一时期西安市建设节水型社会的效益逐步显现,灌溉水利用系数、总量变化率和生态用水比例取代了之前的4项指标,成为主要的障碍因素。灌溉水利用系数说明应注重普及农业节水技术、着重完善灌区管理水平,在渠系输配水、田间水利用以及水分生产的灌溉整体过程中的每项环节均实施相应的节水改进措施^[7]。此外,还应在发展经济的过程中兼顾城市水生态的建设。第3阶段(2013-2016年),与前面排名有较大变化,用水总量变化率、人均日生活用水量、工业用水率和工业用水重复率变为最主要的障碍因素。且从发展趋势上看,用水总量变化率和人均日生活用水量也将是今后一段时期的主要障碍因素。这是由于随着城市的发展,人口数量不断增多,人民生活水平也日趋提高,对水资源量的需求急剧扩大。因此,西安市应加强对用水总量的控制,在此基础上提高生产生活水平,通过调整用水方式,改进用水器具,来提升开发利用绩效,同时还需做好与节水有关的宣传教育工作,增强居民的自主节水意识。

5 结 论

(1)2005-2016年西安市水资源管理综合绩效从0.3264提高至0.6944,年均增速7.10%,表现出先高速增长后稳步提升,绩效水平完成了中级向良好的转变。单项绩效方面,3个准则层绩效总体均呈上升趋势,其中限制纳污绩效在2016年已处于优级水平,增速最快,而开发利用和用水效率绩效还具有较大提升空间。

(2)准则层障碍度上,开发利用对西安市水资源管理绩效的影响最大,用水效率影响次之,限制纳污影响最小。在研究初期3个准则层障碍度差距不大,而后开发利用准则层障碍度呈指数增长趋势,年均速达6.05%,用水效率和限制纳污准则层障碍度则呈下降趋势,年均速分别为2.14%和23.66%。

(3)指标层障碍度上,2005-2007年的主要障碍因子为城市污水处理率、万元GDP用水量、农业用水比例和工业用水比例,2008-2012年为灌溉水利用系数、总量变化率和生态用水比例,2013-2016年以用水总量变化率、人均日生活用水、工业用水率和工业用水重复率为主。

参考文献:

- [1] 白洁芳. 基于“三条红线”的西安市最严格水资源管理绩效评价与分区研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [2] 代兴兰. 最严格水资源管理评价的神经网络模型及其应用

- [J]. 水资源与水工程学报, 2015,26(2):119-125.
- [3] 毕银霞. 陕西省水资源管理问题探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2008,19(4):112-115.
- [4] SANDOVAL-SOLIS S, MCKINNEY D C, LOUCKS D P. Sustainability index for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010,137(5):381-390.
- [5] 任珩,赵成章,安丽涓. 基于突变级数法的民勤绿洲水资源管理政策绩效评价[J]. 资源科学, 2014,36(5):922-928.
- [6] 吴丹,王亚华. 中国七大流域水资源综合管理绩效动态评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(1):32-38.
- [7] 杨丹. 区域水资源“三条红线”管理绩效评价模型研究及实证分析[D]. 泰安:山东农业大学, 2014.
- [8] 凌佳楠,唐德善. 江苏省宝应县水资源“三条红线”管理效果评价[J]. 人民长江, 2018,49(1):70-74.
- [9] 周蓓棋,徐向阳,贾晨,等. 改进主成分分析法在区域水资源综合评价中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(3):88-91+95.
- [10] 马艳. 基于AHP的西安市水资源可持续开发利用模糊综合评价[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [11] 徐鸿. 一种区域水资源管理绩效评价模型及实证研究[J]. 人民黄河, 2016,38(9):42-45.
- [12] 黄显峰,钟婧玮,方国华,等. 基于物元分析法的水资源管理现代化评价[J]. 水利水电科技进展, 2017,37(3):22-28.
- [13] TIAN Guangdong, ZHANG Honghao, ZHOU Mengchu, et al. AHP, gray correlation, and TOPSIS combined approach to green performance evaluation of design alternatives[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018,48(7):1093-1105.
- [14] 孙晓东,焦玥,胡劲松. 基于组合权重的灰色关联理想解法及其应用[J]. 工业工程与管理, 2006(1):62-66.
- [15] 杨增玲,楚天舒,韩鲁佳,等. 灰色关联理想解法在秸秆综合利用方案优选中的应用[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2013,29(20):179-191.
- [16] 刘东,龚方华,付强,等. 基于博弈论赋权的灌溉用水效率GRA-TOPSIS评价模型[J]. 农业机械学报, 2017,48(5):218-226.
- [17] 雷勋平,ROBIN Q,刘勇. 基于熵权TOPSIS模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016,32(13):243-253.
- [18] 陈加良. 基于博弈论的组合赋权评价方法研究[J]. 福建电脑, 2003(9):15-16.
- [19] 吴一凡,雷国平,路昌,等. 基于改进TOPSIS模型的大庆市城市土地利用绩效评价及障碍度诊断[J]. 水土保持研究, 2015,22(4):85-90.
- [20] 张锐. 二十世纪九十年代以来西安市水利管理变迁[J]. 新西部(理论版), 2016(20):37.